

# CANDLESの状況と将来

## A02 : $^{48}\text{Ca}$ を用いたニュートリノのマヨラナ性の研究と 超高分解能技術の開発

阪大  
岸本忠史

CANDLES Collaboration

大阪大学理学研究科

岸本忠史、吉田斉、鈴木耕拓、角畑秀一、Wang Wei、Chan Wei Min、Van Trang、  
石川貴志、田中大樹、田中美穂、土井原正明、前田剛、太畑貴綺、鉄野高之介

大阪大学RCNP

能町正治、味村周平、梅原さおり、中島恭平、飯田崇史、松岡健次

福井大工学部

玉川洋一、小川泉、川村篤史、富田翔悟、藤田剛志、原田知優、坂本康介、  
吉澤真敦、犬飼祐司

徳島大総合科学

伏見賢一

大阪産業大学

裕隆太、中谷伸雄

佐賀大学文化教育学部

大隅秀晃

# Candles



# A02: $^{48}\text{Ca}$ を用いたニュートリノのマヨラナ性の 研究と超高分解能技術の開発 -- CANDLES --



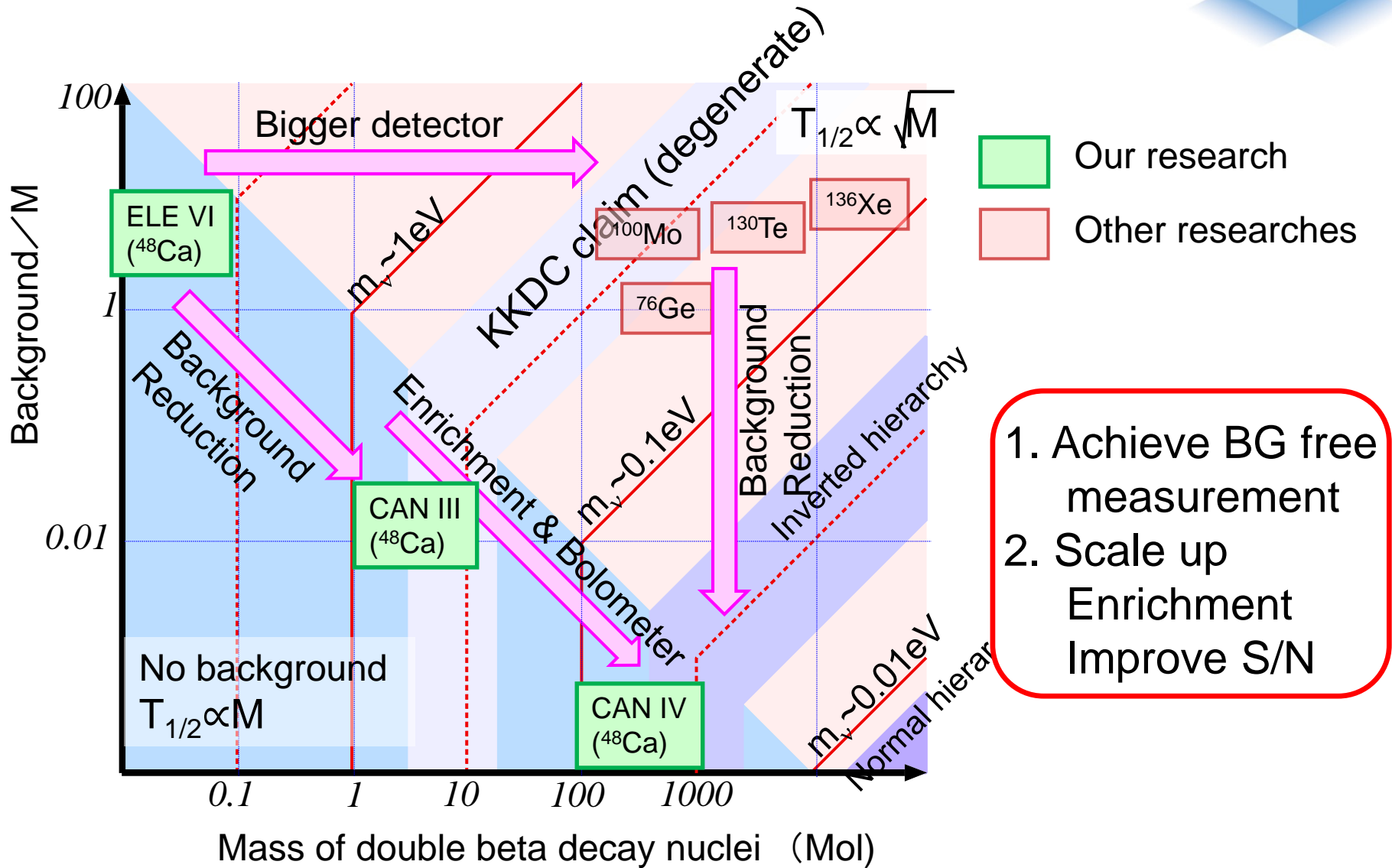
- $^{48}\text{Ca}$ の2重ベータ崩壊の研究
  - CANDLES III(UG) 実験
    - 低BG化
    - 高分解能化
- $^{48}\text{Ca}$ の濃縮技術の開発と濃縮
  - $\beta\beta$ 崩壊核の増大とBG低減の同時達成
    - CE
    - レーザー
    - MCCCE
- ボロメーター技術の開発
  - 高エネルギー分解能化

遮蔽

CE樹脂  
μリアクター



# Strategy of CANDLES

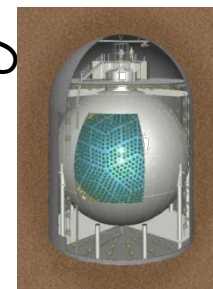
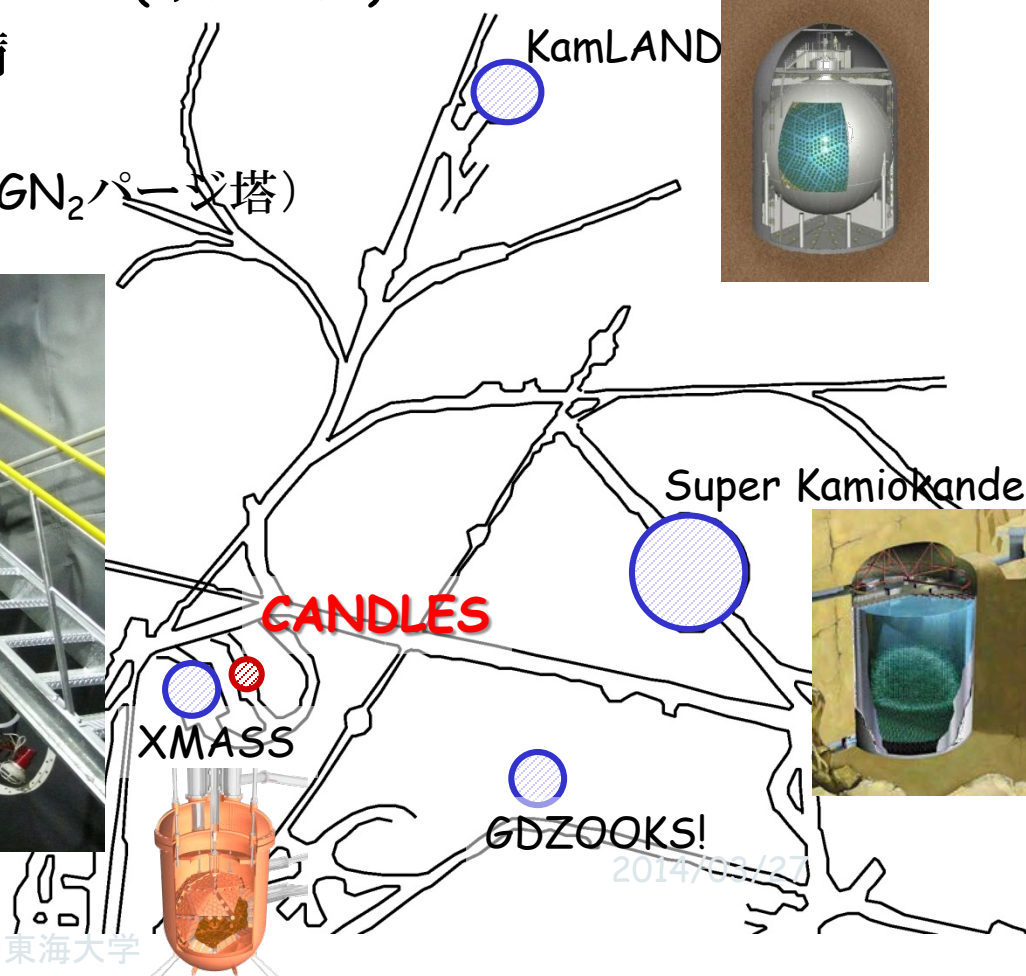


# CANDLES III @ Kamioka

## ● CANDLES III

- Site: 神岡鉱山地下 ~1000 m
- 検出器: 直径3m × 高さ4m (水タンク)
- 液体シンチレータ設備
  - リザーバタンク
  - 純化装置 (液々抽出、GN<sub>2</sub>パーゴ塔)

## Kamioka Lab. Map

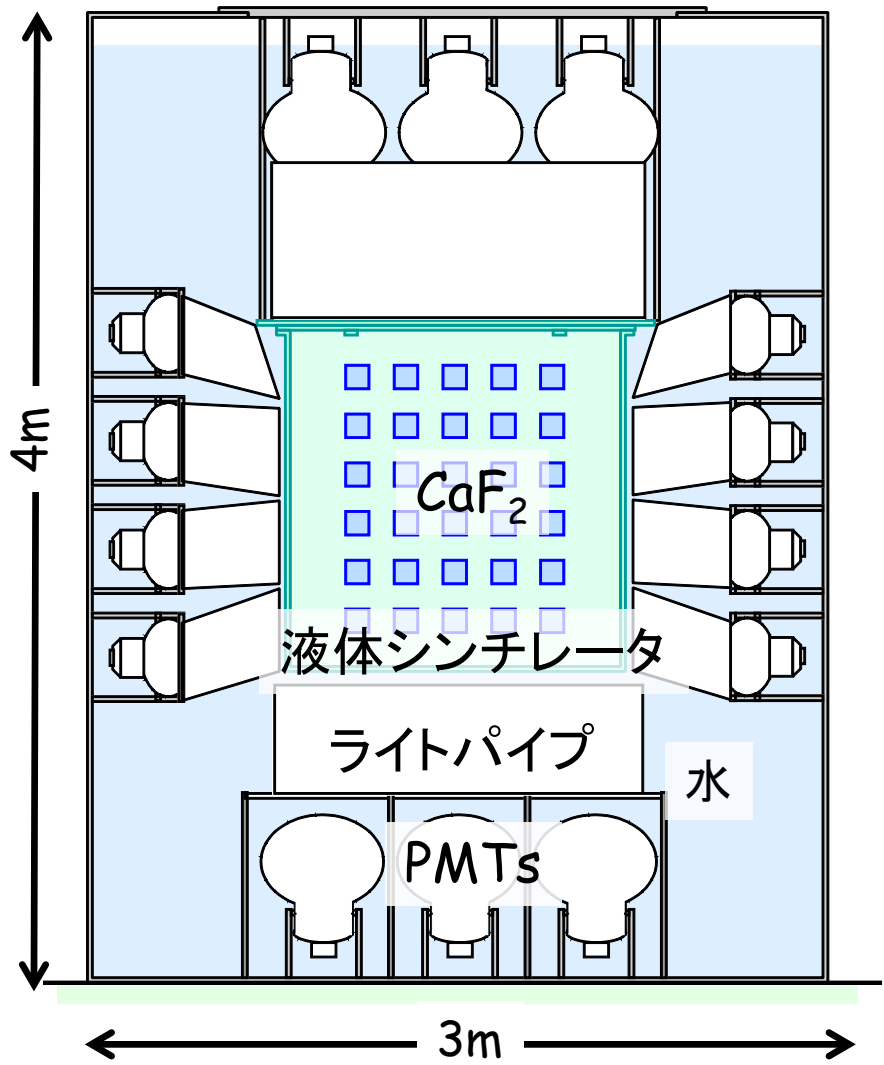




# CANDLES III(UG)

CANDLES at Kamioka underground laboratory

## CANDLES III



**CaF<sub>2</sub> シンチレータ (CaF<sub>2</sub>(pure))**

305 kg (96個 × 3.2kg)

$\tau \sim 1\mu\text{sec}$

**液体シンチレータ (LS)**

全方向ベトー検出器

体積2m<sup>3</sup>

$\tau \sim \text{数}10\text{nsec}$

**光電子増倍管**

13inch PMT × 48

20inch PMT × 14

**ライトパイプ**

集光効率改善：エネルギー分解能改善

**ベトー検出器システム**

波形の違いを利用

CaF<sub>2</sub>(pure) :  $\sim 1\mu\text{sec}$

Liquid scintillator : 数 10 nsec



# CANDLES III(UG)

CANDLES at Kamioka underground laboratory

## CANDLES III

## CaF<sub>2</sub> シンチレータ (CaF<sub>2</sub>(pure))

305 kg (96個 × 3.2kg)

$\tau \sim 1\mu\text{sec}$

## 液体シンチレータ (LS)

全方向ベトー検出器

体積2m<sup>3</sup>

$\tau \sim$  数10nsec

## 光電子増倍管

13inch PMT × 48

20inch PMT × 14

## ライトパイプ

集光効率改善：エネルギー分解能改善

## ベトー検出器システム

波形の違いを利用

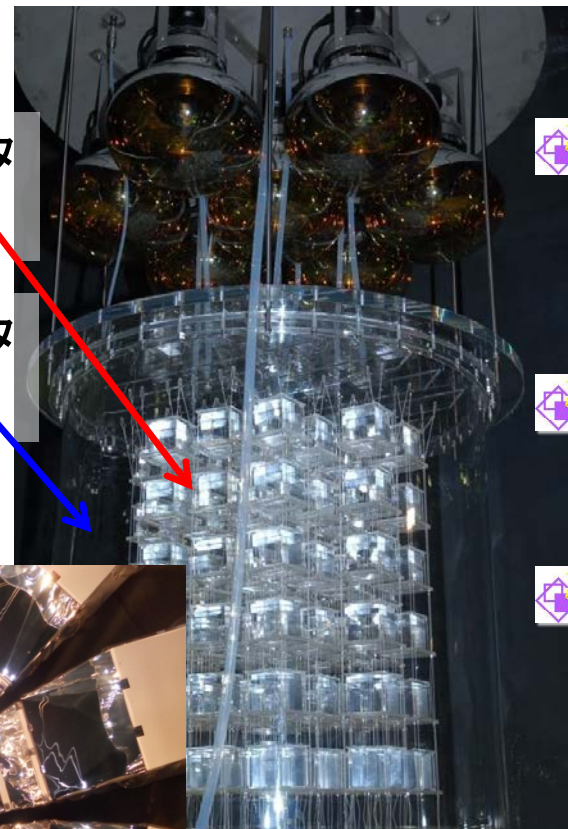
CaF<sub>2</sub>(pure) :  $\sim 1\mu\text{sec}$

Liquid scintillator : 数 10 nsec

CaF<sub>2</sub> シンチレータ  
(305kg)

液体シンチレータ  
タンク(2m<sup>3</sup>)

光電子増倍管  
ライトパイプ

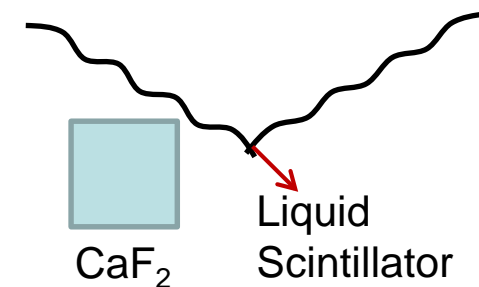
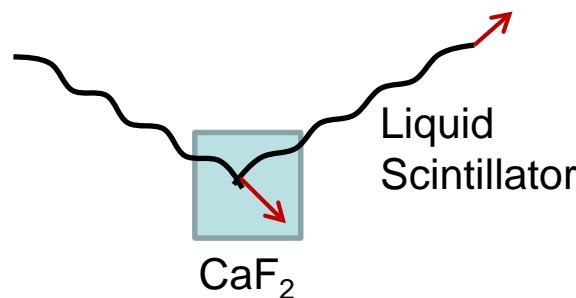
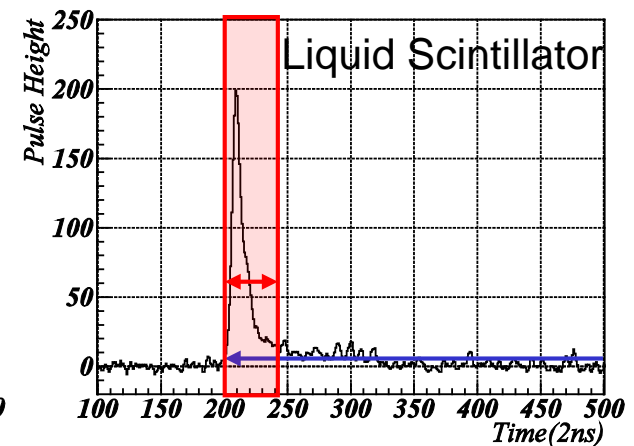
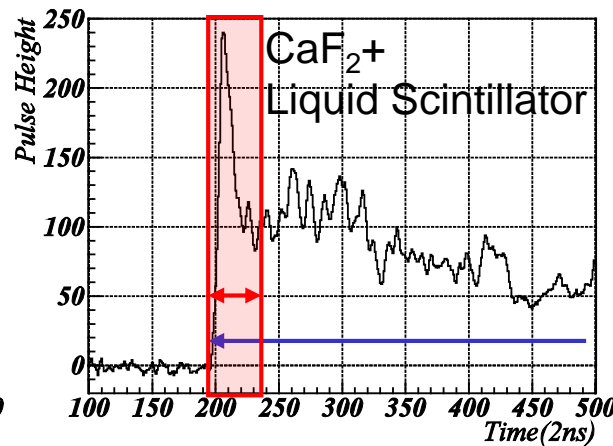
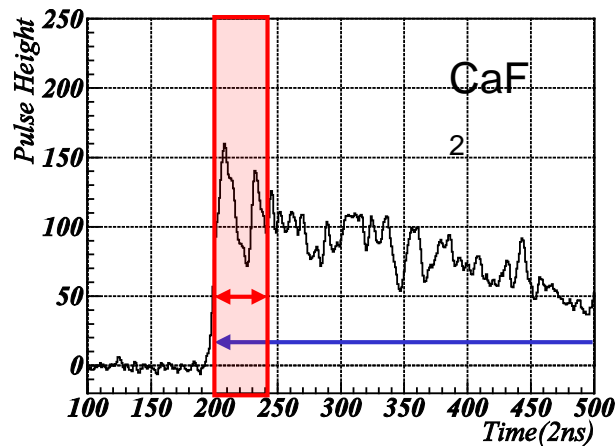


# 外部起源のBG

## Rejection of LS Events



- Pulse shape information by 500 MHz Flash ADC
  - Typical Pulse Shapes



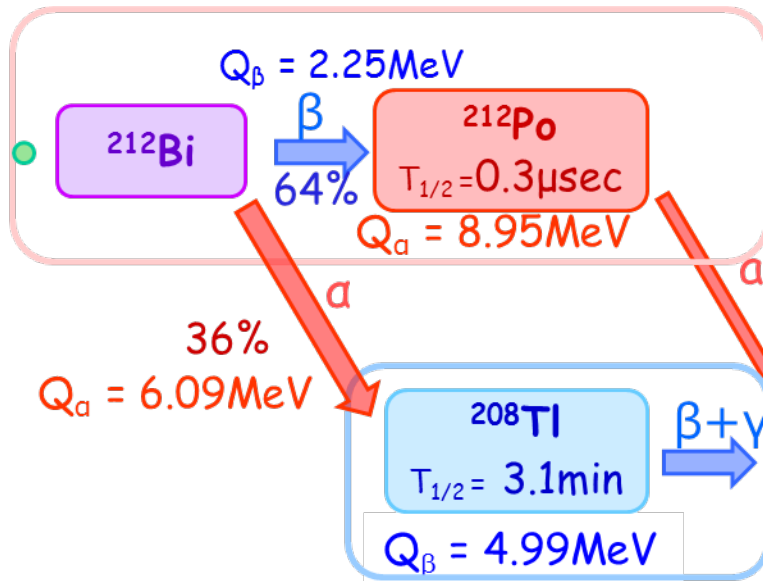
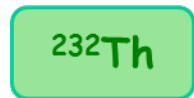




# 内部起源のBG @ Q値領域

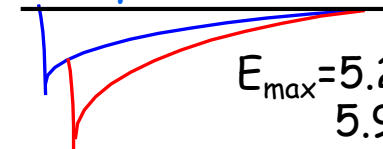
## CaF<sub>2</sub>不純物起源のバックグラウンド事象

連続信号  
Th系列



連続信号

$\beta+\alpha$



$E_{\text{max}} = 5.2\text{MeV}(\text{Th})$   
 $5.9\text{MeV}(\text{U})$

CaF<sub>2</sub>(pure) 減衰定数:  $\sim 1\mu\text{s}$

208Tl 事象

$212\text{Bi}$  と  $208\text{Tl}$  ( $T_{1/2} = 3\text{分}$ )...  
事象位置と  
時間相関から除去

先行 $\alpha$ 線を $\alpha$ - $\gamma$ 波形解析で識別 (偶然同時計数を低減)  
→時間差解析

## バックグラウンド除去

連続事象

: 時間差が長い事象→連続波形を識別  
時間差が短い事象→ $\alpha$ 線波形を除去

208Tl事象

: 先行 $\alpha$ 信号( $212\text{Bi}$ )との位置・時間相関



# 連続崩壊事象

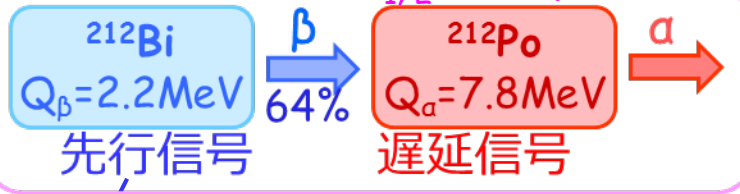
$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{212}\text{Po}$  崩壊 3MeV以上のエネルギー領域に分布

Th系列

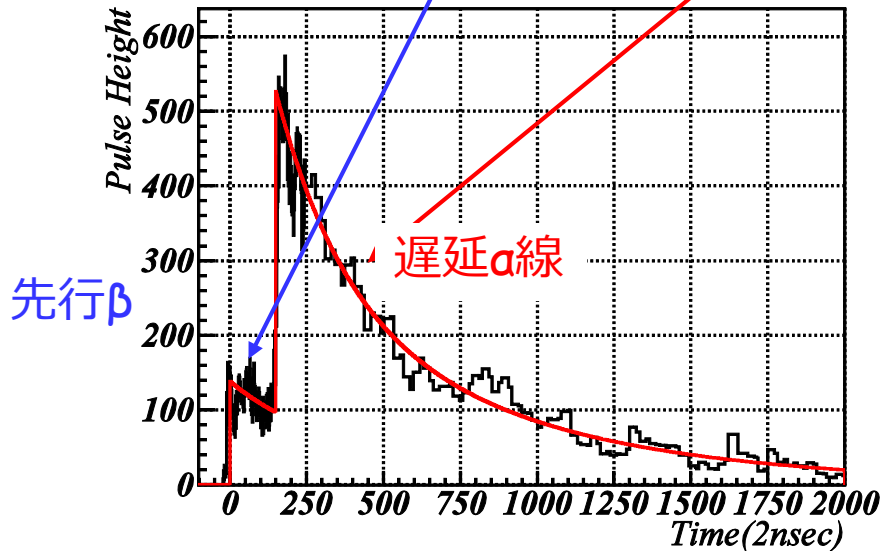
$^{232}\text{Th}$   
 $T_{1/2} = 1.1 \times 10^{10}$ 年

連続崩壊

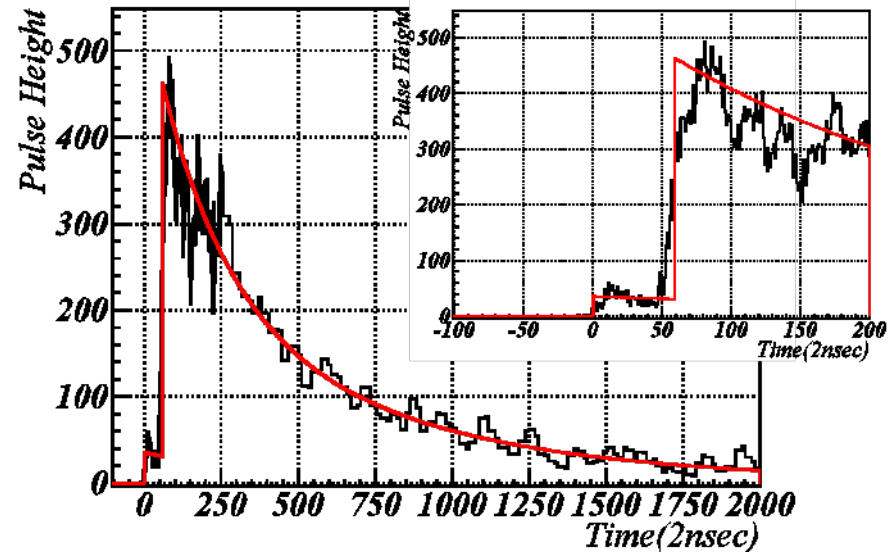
$T_{1/2} = 0.3 \mu\text{sec}$



典型的な連続崩壊波形



時間差が短い連続信号波形



2つの手法で除去する

- 1、時間差識別によって除去：95%以上の除去効率
- 2、α線波形弁別によって除去

62本PMTの足し合わせ波形

# 波形弁別 (α粒子の同定) -連続崩壊、<sup>208</sup>Tlの除去-

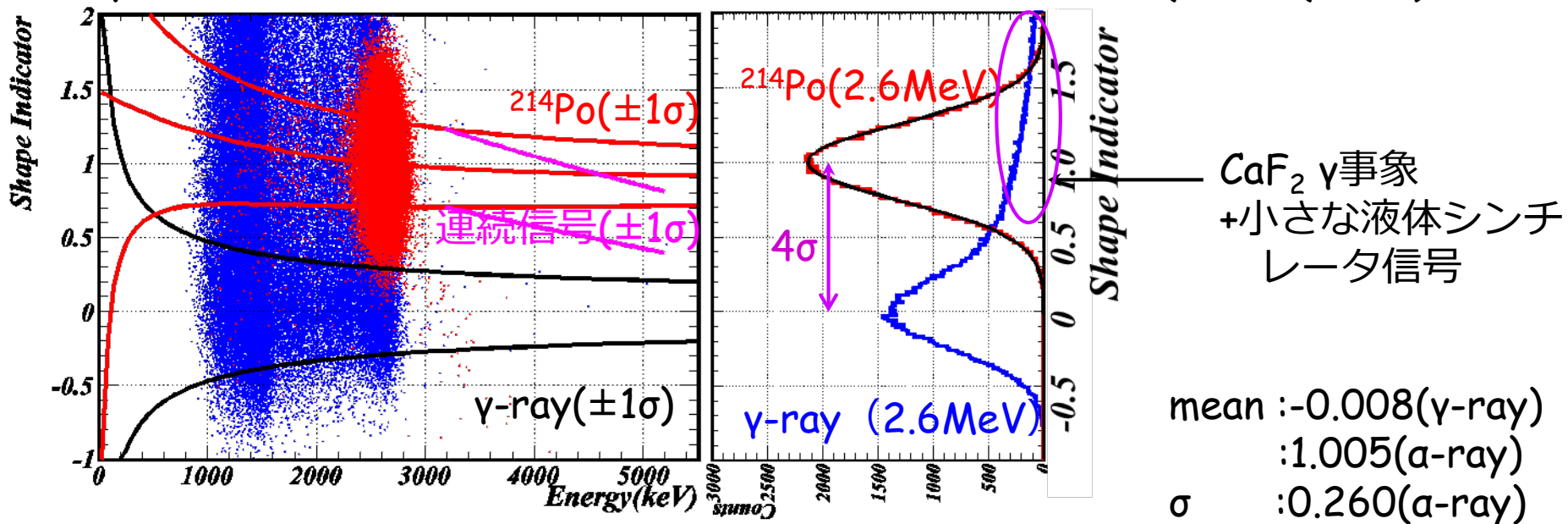


## 波形解析によるα-γ粒子弁別 : shape indicator(SI)

α線 : <sup>214</sup>Po 7.6MeV( $E_e=2.6$ MeV)

γ線 : <sup>208</sup>Tl 2.6MeV

ref : Shape Indicator  
(PRC67(2003) 014310)



“ $\chi^2$  フィット”

: 液体シンチレータ信号除去

“Shape Indicator”

: α-γ弁別 ( $\chi^2$ フィットの補完解析)

SIによるα線識別効率97% @ 2.6MeV (γ線:3%) 99%@4.3MeV  
<sup>212</sup>Bi選択時にはさらにγ線事象を低減するために $\chi^2$ も併用。

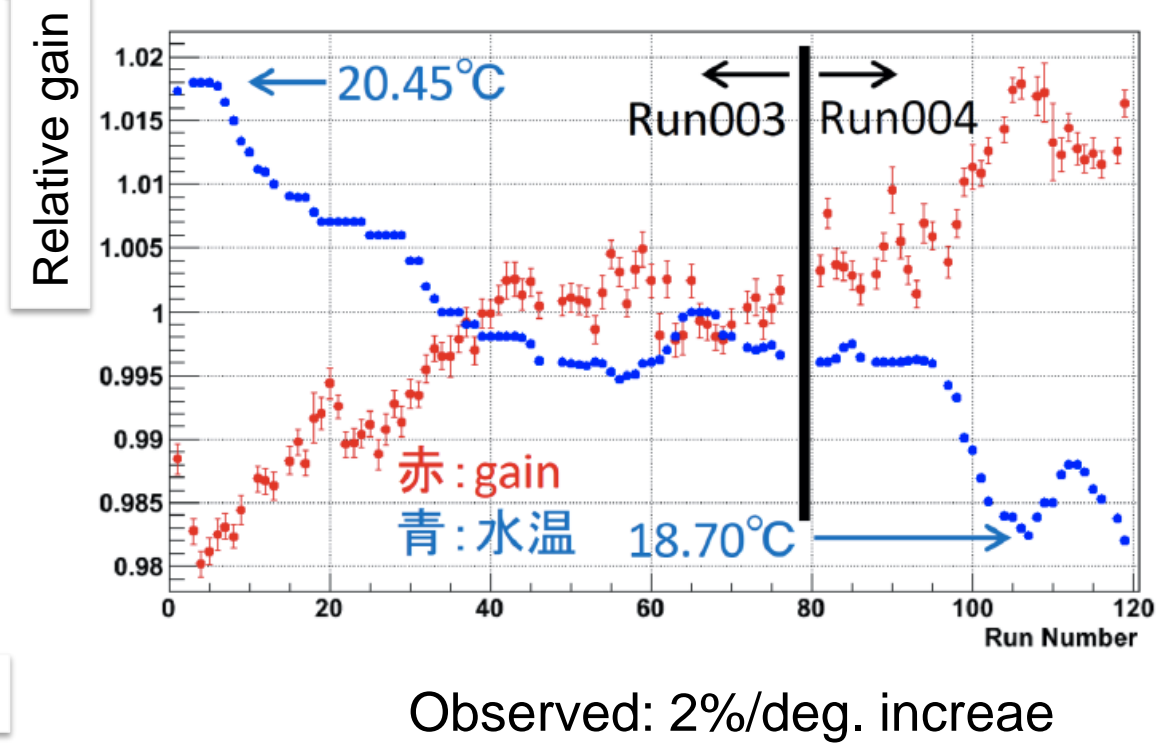
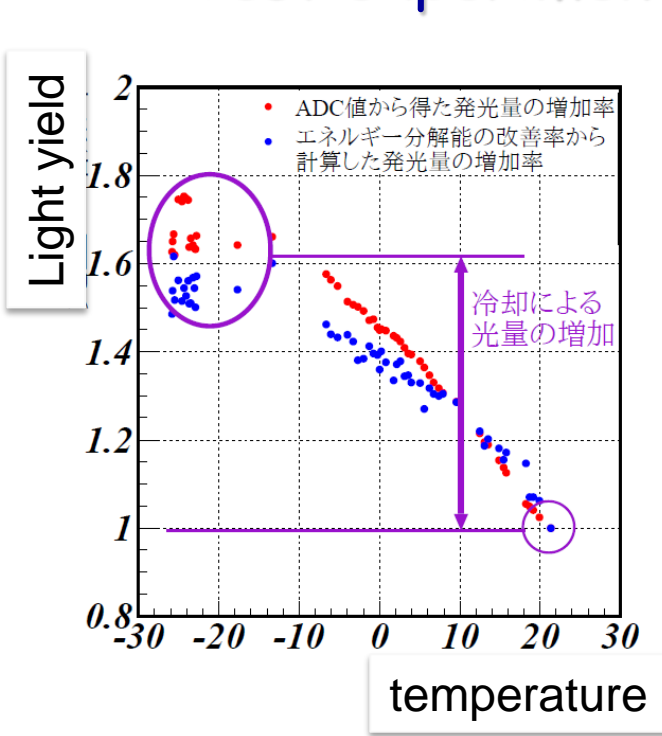


# エネルギー分解能向上 (冷却)

CaF<sub>2</sub>

Light yield increase at low temperature

Test experiment



Cool CANDLES III from 20 to 0 degrees.  
40% increase: This year



# 検出器冷却・温度安定化装置導入

## 検出器の冷却

CANDLES IIIで冷却性能テスト

実験室全体を冷却して温度コントロール

到達温度：室温2℃、検出器3℃、温度変動±0.1℃

インストールが終了し性能評価

+ 地磁気補償コイル

$$\left. \begin{array}{l} 1.4 \\ 1.3 \end{array} \right\} = 1.8$$

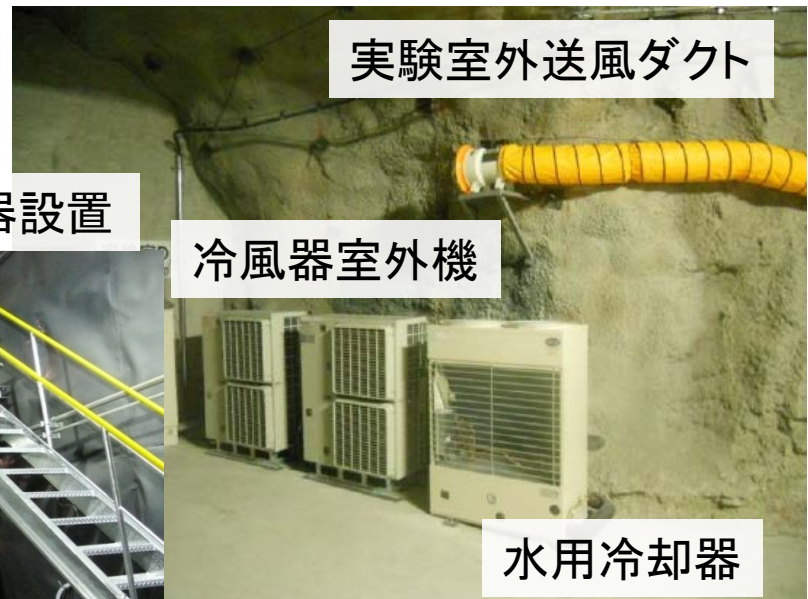


冷風器



本体タンク

この階段上部分に冷風器設置



実験室外送風ダクト

冷風器室外機

水用冷却器



# 中性子捕獲からの $\gamma$ 線

中性子線源( $^{252}\text{Cf}$ )を検出器・岩盤に照射

飯田、角畑、中島  
(2014年物理学会他)

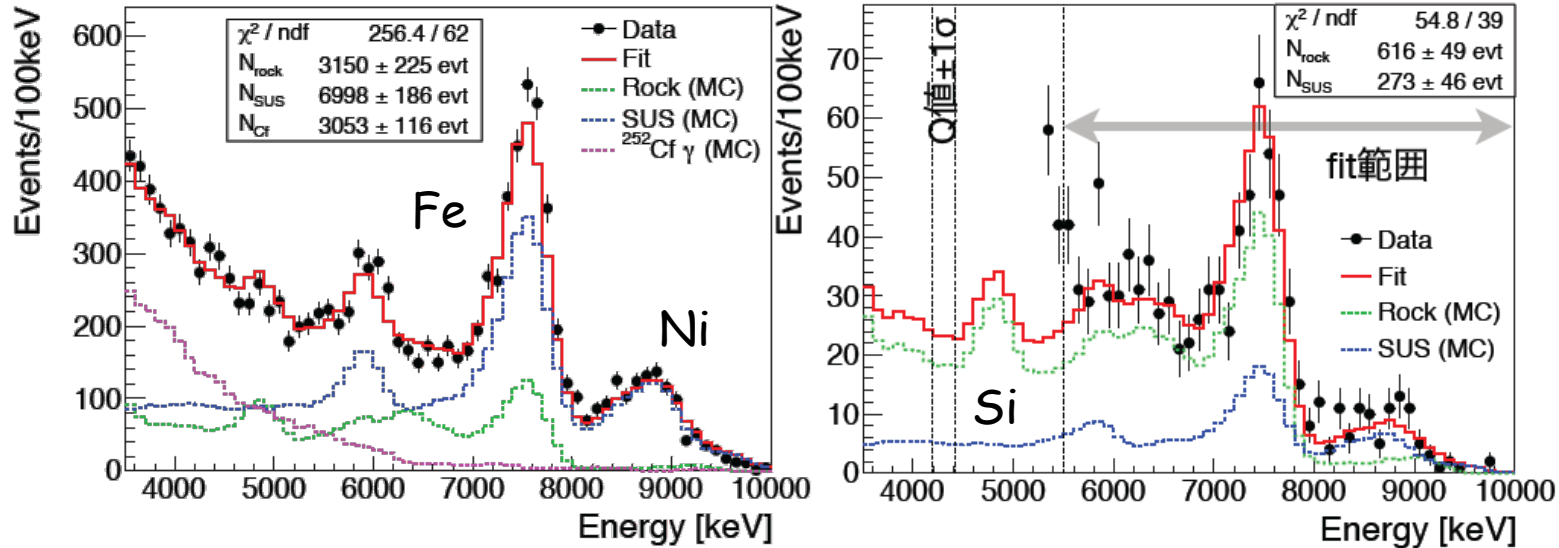
$^{252}\text{Cf}$ 測定と通常測定のエネルギースペクトルを比較

エネルギースペクトル  
 $^{252}\text{Cf}$ 測定 (3時間)

通常測定 (88日)

(低エネルギーLS信号があるものを含む)

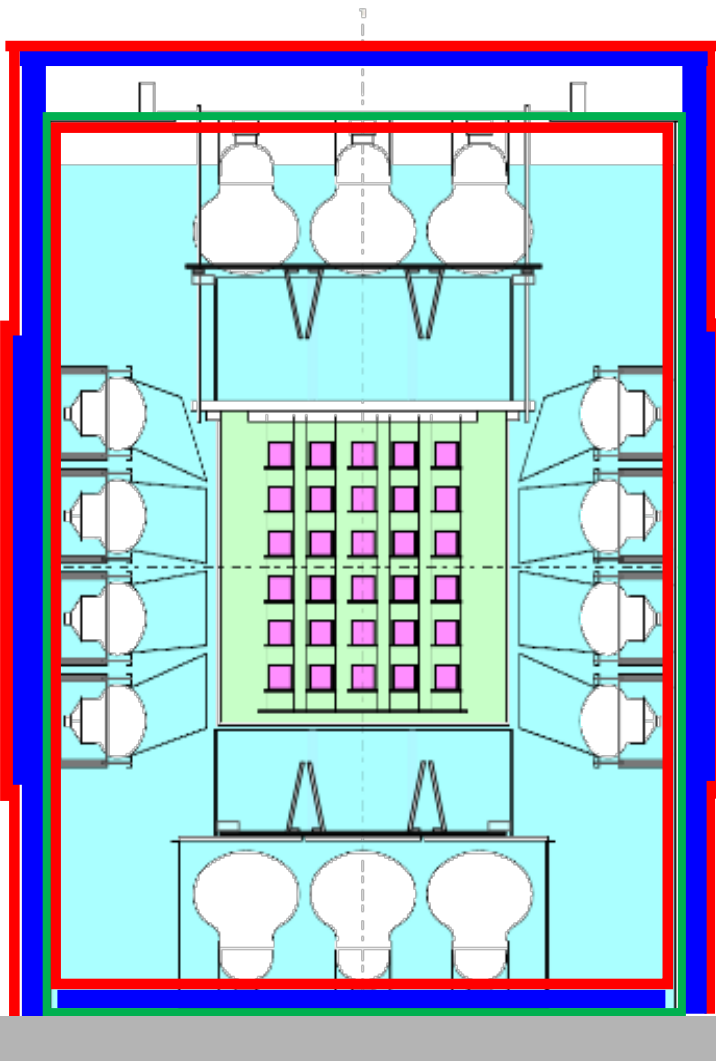
線源設置の様子



高エネルギー領域：ステンレス・岩石の(n, $\gamma$ )反応でスペクトルを再現した。  
→予想される事象量の見積もり

# 中性子捕獲 $\gamma$ 線遮蔽

CANDLES IIIシールド概念図



- CANDLESタンク部分
- 鉛シールド( $\gamma$ 線) 7~12cm
- ホウ素シート(中性子) 5mm

- ◆ 遮蔽：1/100に低減
  - ・ 鉛（タンク外側）：岩盤からの $\gamma$ 線を止めるための鉛
  - ・ ホウ素（タンク内側）：タンク(SUS)に入る中性子を吸収( $n, \gamma$ )を抑える



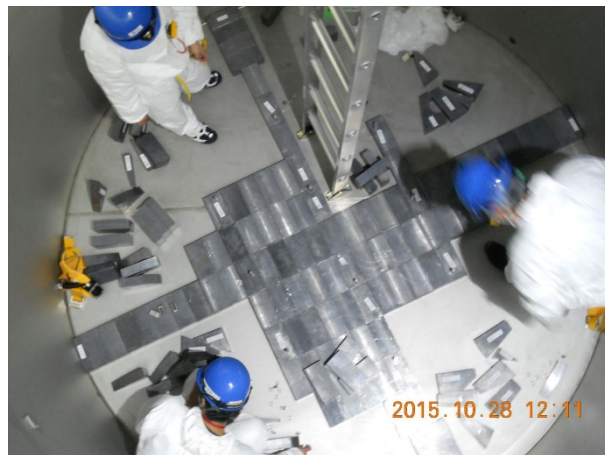
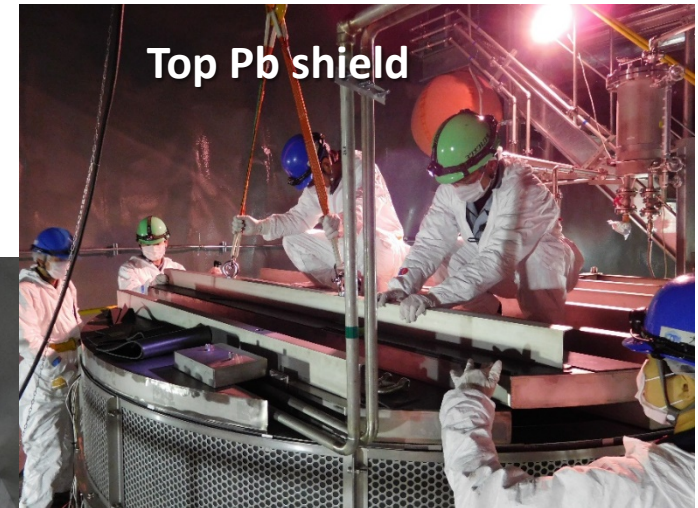
鉛( $\gamma$ 線)  
横:完成  
上下

B(中性子)



# Pb shield construction

- Pb shield construction was started from March 2015.
- All the collaborators worked very hard!  
I used even professors like a horse ;)

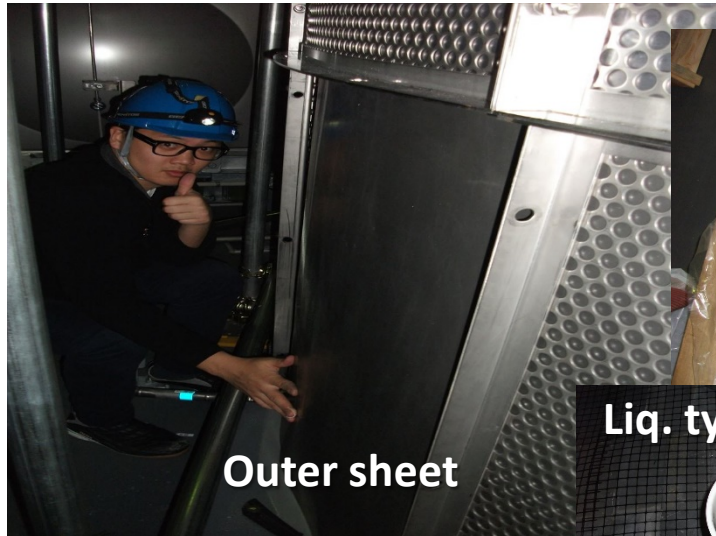




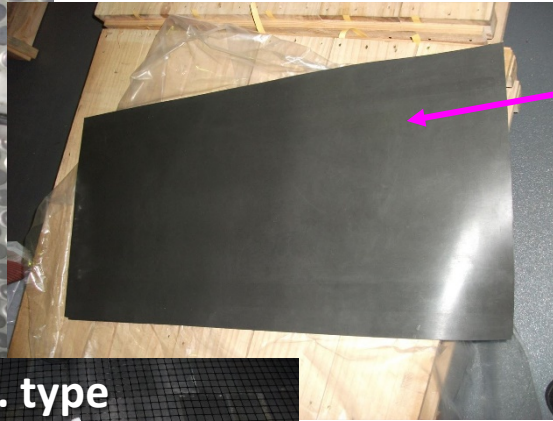


# B shield construction

## ➤ Neutron shield (B sheet) installation.

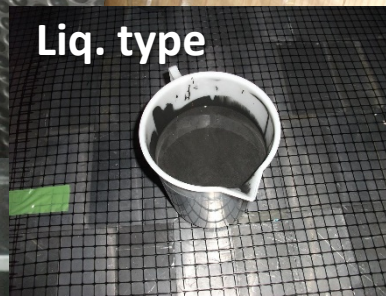


Outer sheet

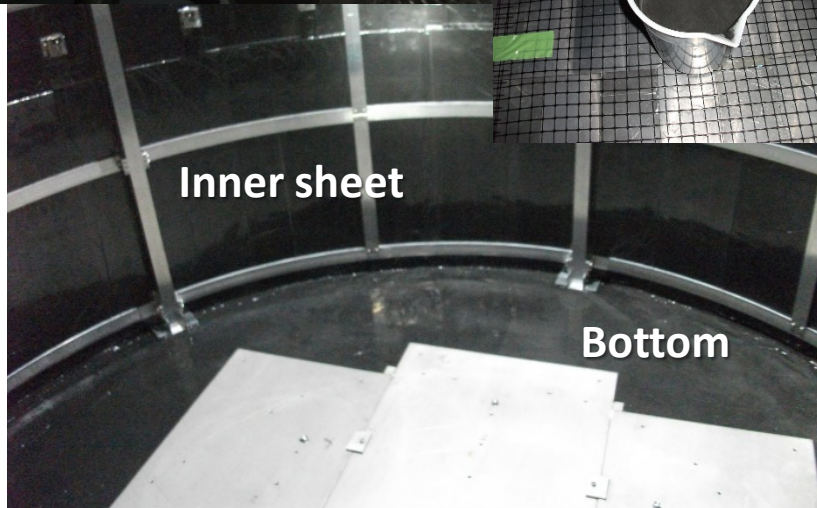


**B<sub>4</sub>C 40wt%  
Silicone rubber  
(B sheet)**

4-5mm thickness.  
Covered 100m<sup>2</sup> area



Liq. type

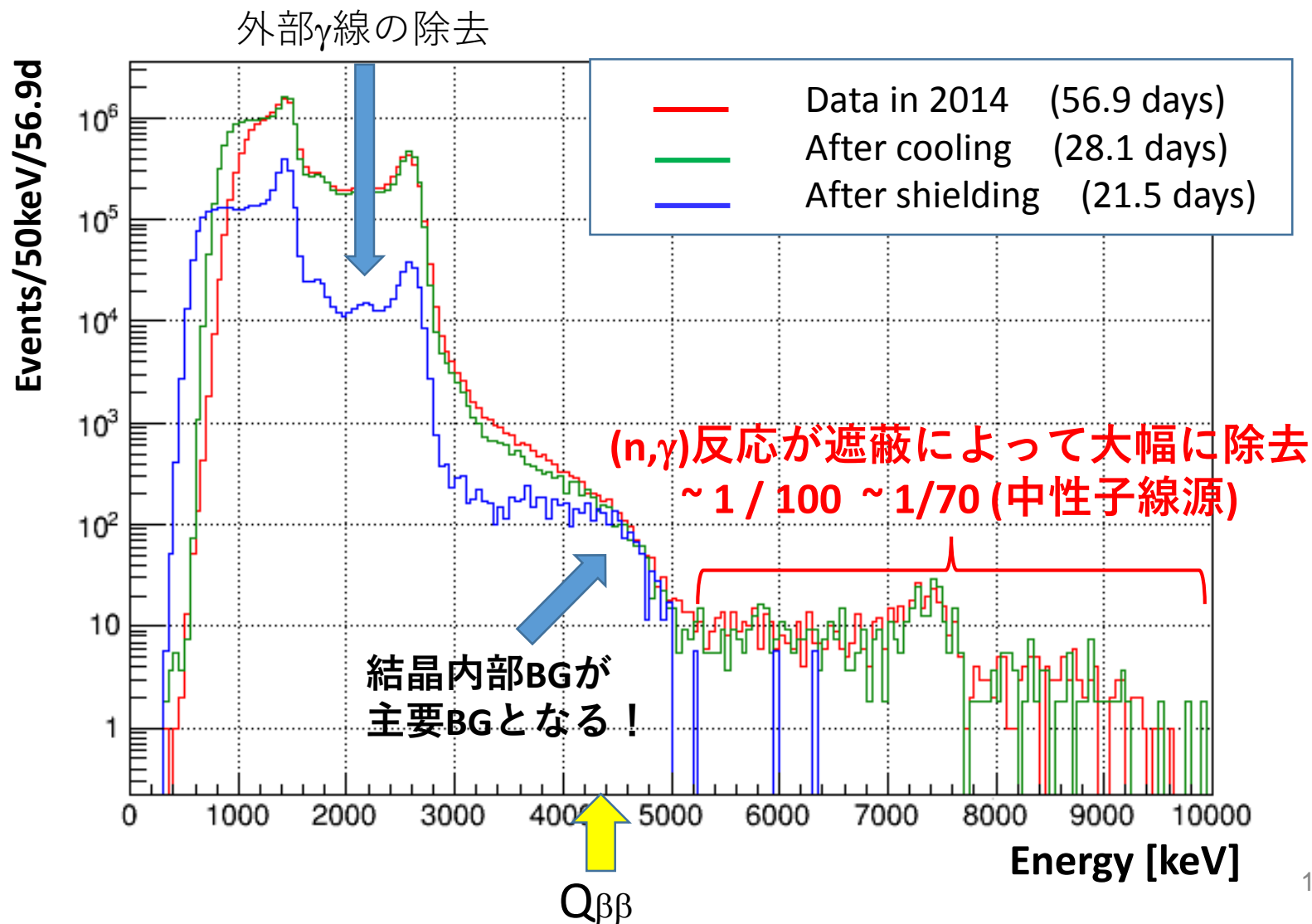


Inner sheet

Bottom

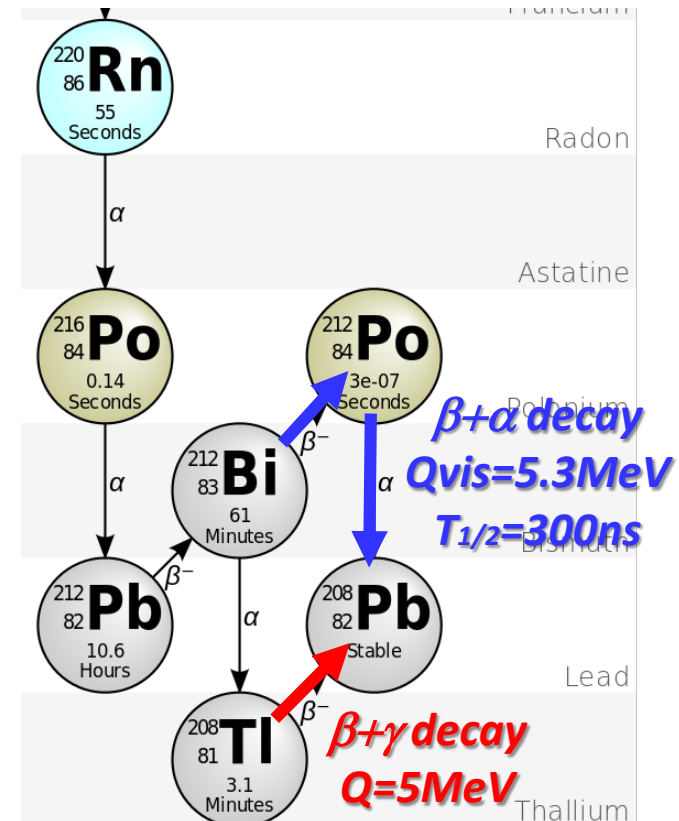
- For bottom B shield, liquid type was poured on top of the Pb.
- This is for both shielding neutron and waterproofing the bottom Pb blocks.
- B and Pb elution into water have been checked periodically after water filling.

# Energy spectra after shield



# Internal backgrounds and reduction

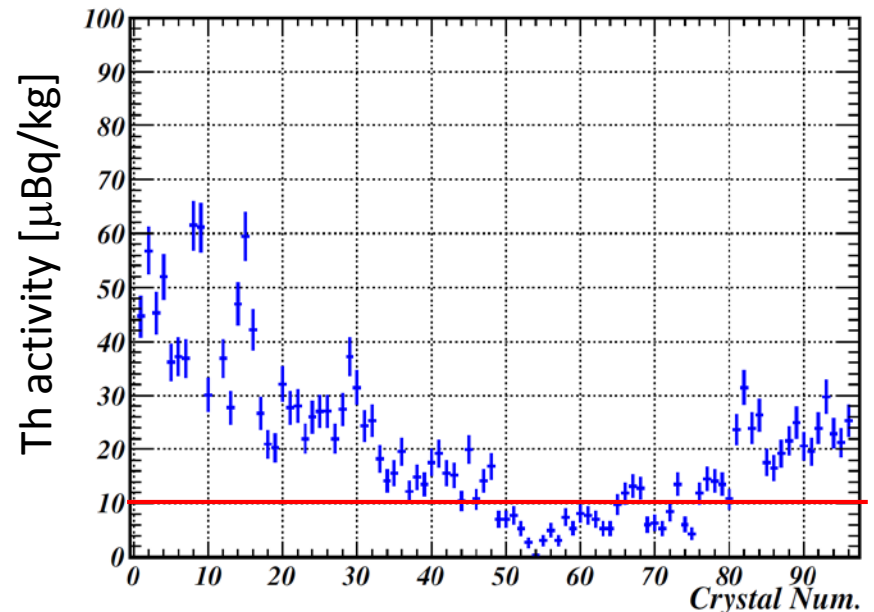
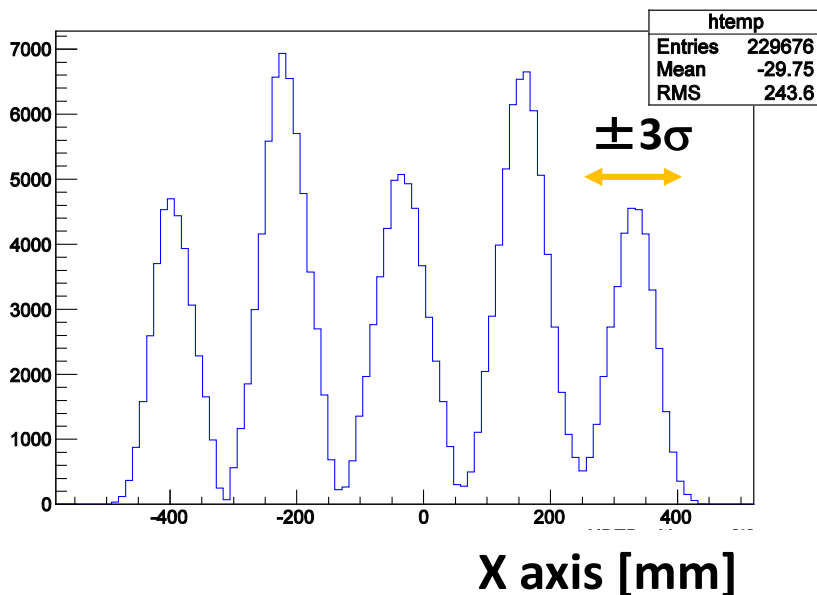
- External BGs were reduced by LS active shield.
- Remaining BGs are originating from internal radioactivity of Th chain ( $^{208}\text{Tl}$  and  $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ ).
- $2\nu\beta\beta$  is not serious BG in current sensitivity. (it will be major BG after  $^{48}\text{Ca}$  enrichment)
- We reject remaining BGs by analysis.



# Position reconstruction and crystal selection

- Position of each event is reconstructed by weighted mean of observed charge in each PMT.
- Crystal separation is  $\sim 7\sigma$  peak to peak.
- Crystal selection criteria is within  $3\sigma$  from the peak.
- 27 clean crystals (Th contamination  $< 10 \mu\text{Bq/kg}$ ) out of 96 crystals are selected and the results are compared to all crystals.

$$\frac{\sum N_{pe}(i) \times \overline{PMT}(i)}{\sum N_{pe}(i)}$$



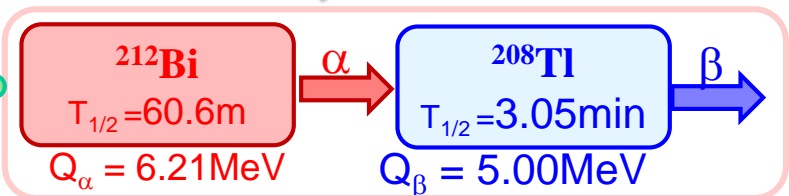
# Estimation of efficiencies

## $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$



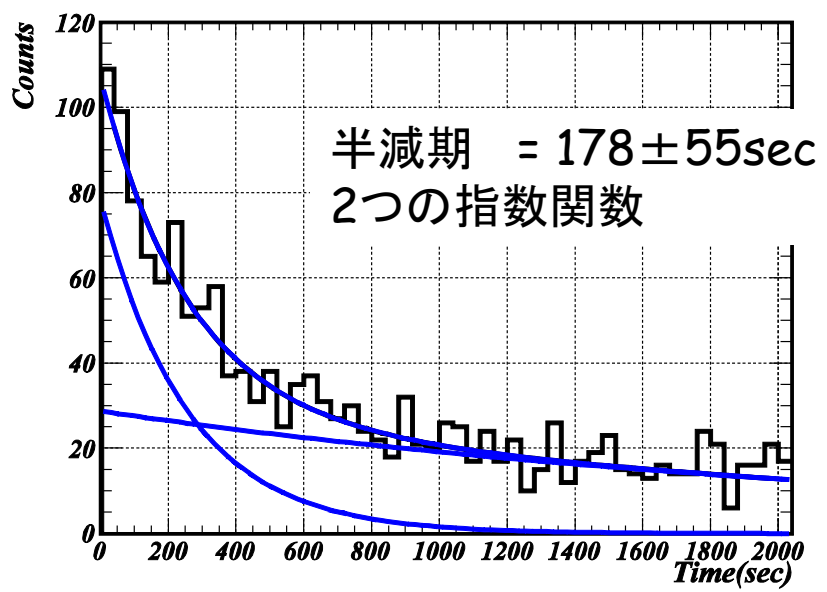
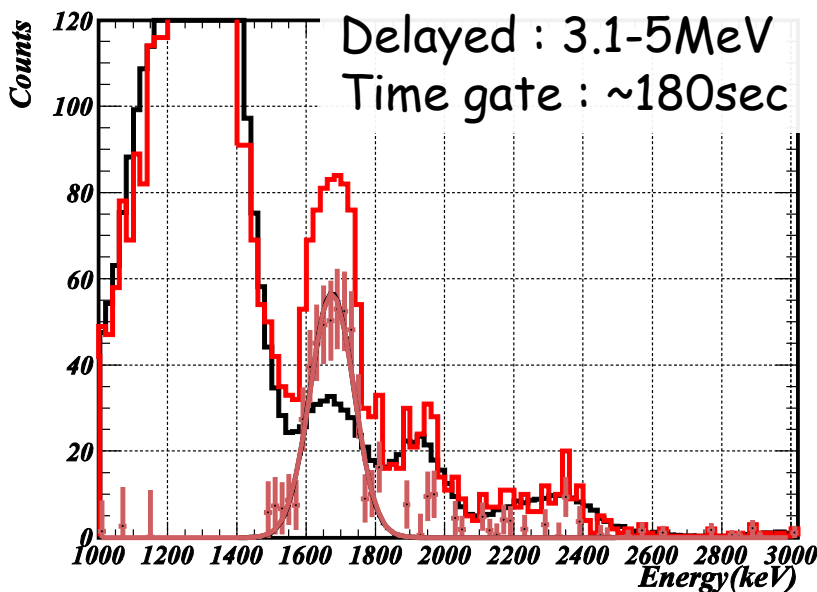
Run009(前半だけ使用)

Th系列



$\alpha$ - $\beta$ 崩壊

Energy spectrum of prompt events ( $^{212}\text{Bi}$  candidate)

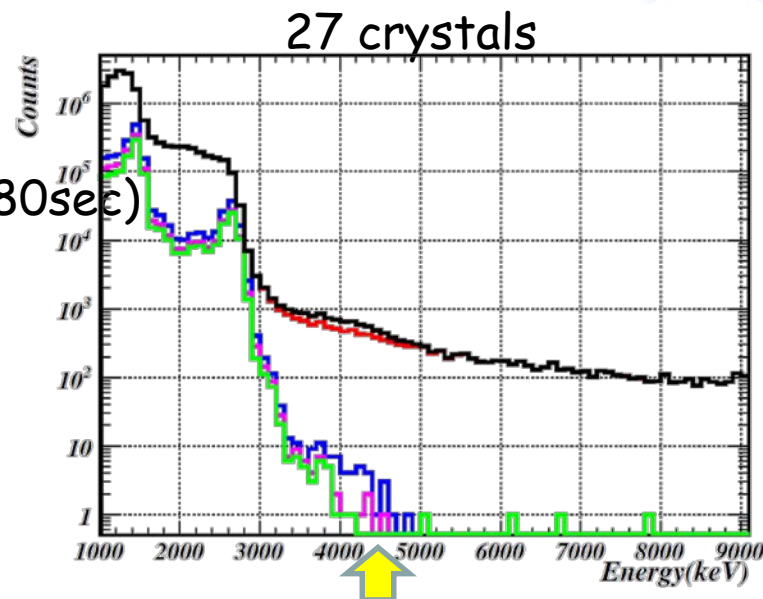
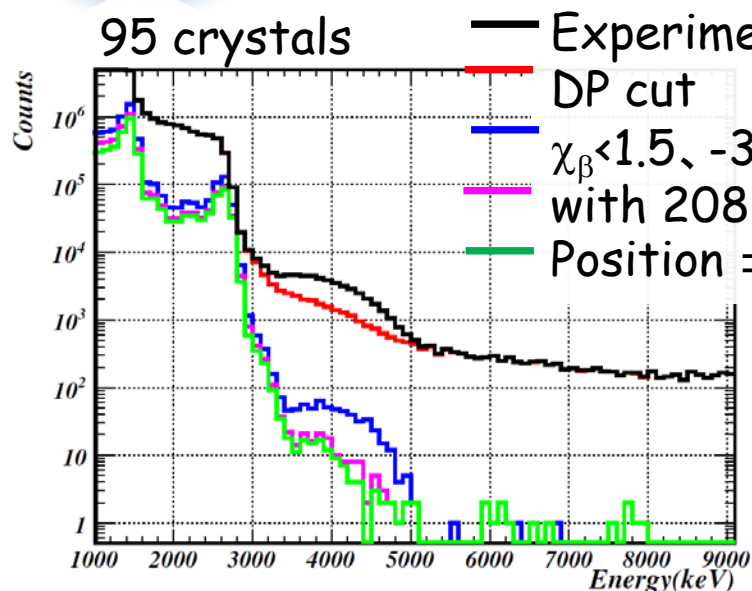


- $^{212}\text{Bi}$  candidate
- Accidental event
- $^{212}\text{Bi}$  candidate-Accidental

# Energy spectra

Preliminary

## Energy spectra :Run009(131days)



Num of event	95 crystals(Run009)			27 crystals(Run009)		
	Q $\beta\beta$	4-5MeV	5.5-6.5MeV	Q $\beta\beta$	4-5MeV	5.5-6.5MeV
without $^{208}\text{Tl}$ cut	115(100%)	257	8	12(100%)	23	1
with $^{208}\text{Tl}$ cut	19(70.7%)	49	6	3(72.8%)	6	1
Position $2\sigma$	10(66.2%)	34	6	0(68.1%)	2	1

Calculation from  
 $^{208}\text{Tl}$ (2.6MeV) count rate

# sensitivity

Preliminary

	Cut-1	Cut-2	Cut-3
Cut condition	Chi2<1.5,-3σ<SI<1σ, -2σ<position<2σ, DP<20nsec -1σ<Onbb window<2σ with 208Tl cut	chi2<1.5,-3σ<SI<1σ, -3σ<position<3σ, DP<20nsec -1σ<Onbb window<2σ with 208Tl cut	chi2<1.5,-3σ<SI<1σ, -3σ<position<3σ, DP<20nsec -1σ<Onbb window<2σ
Onbb efficiency	0.389±0.057	0.430±0.059	0.591±0.081
BG rate(exp)	0(27CaF), 10(95CaF)	3, 19	12, 115
Exp BG rate	0.56,5.4(±100%)	1.11,9.3(±100%)	6.8,64(±100%)
半減期 (exp BGが多い ほど長い。)	6.2×10 <sup>22</sup> year(27個) 3.8×10 <sup>22</sup> year(95個)	1.9×10 <sup>22</sup> year, 2.3×10 <sup>22</sup> year,	0.92×10 <sup>22</sup> year
感度(exp BGが 少ないほど長 い。)	3.6×10 <sup>22</sup> year(27個) 6.2×10 <sup>22</sup> year(95個) +100% BGで計算	3.0×10 <sup>22</sup> year, 4.9×10 <sup>22</sup> year	

report

\*ELEGANT VI sensitivity

efficiency :0.53, measurement time :4947kg · day, 5.8×10<sup>22</sup>年

# $^{48}\text{Ca}$ の濃縮



- 物理的方法

- 遠心分離法: ガスのみ (核燃料)

- レーザー法: 実用化は?

- R&D 仁木: 反跳法

テキサス大: MAGIS  
スピン偏極 + 磁場勾配

- 質量分析法:  $^{48}\text{Ca}$ 等、高価 (10g/億)

- 化学的方法

- 反応率の差: 重水素、ホウ素

- クラウンエーテル(CE)

- 樹脂法 梅原+α

CE樹脂の自作  
コスト ~1/1000

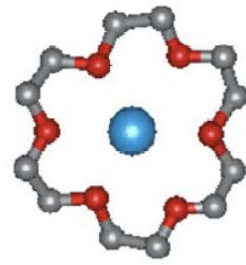
- マイクロリアクター 裕+α

- 電気泳動法: MCCCE法 岸本+α

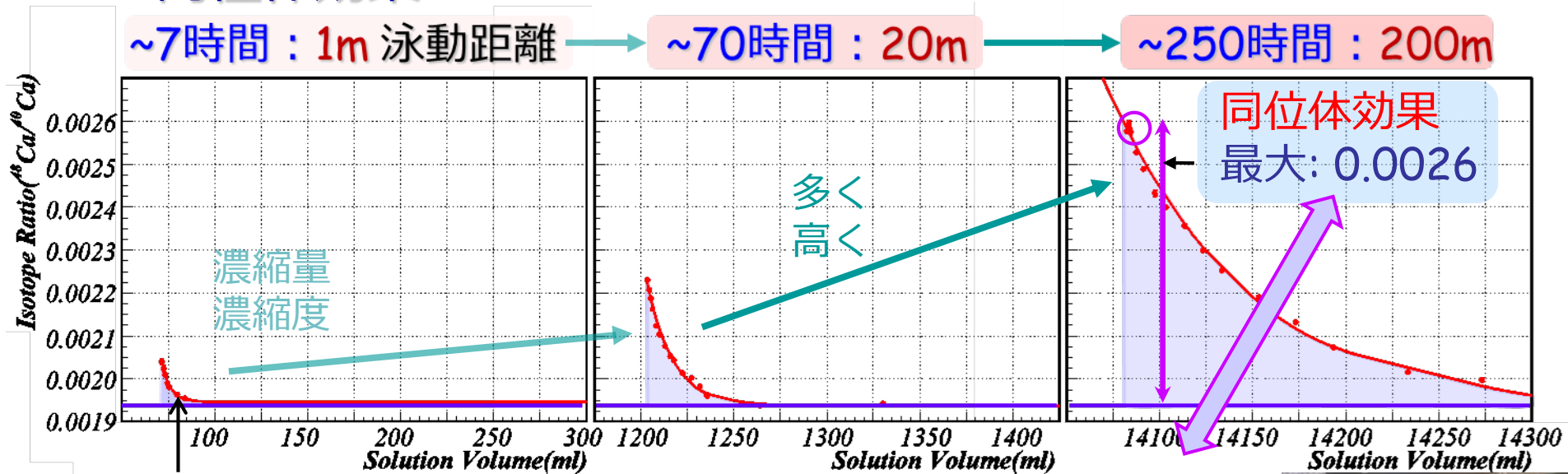
高い濃縮度 ~3倍  
再現性に難



# CE樹脂による $^{48}\text{Ca}$ 濃縮



## 同位体効果



■ ク라운エーテルによる濃縮

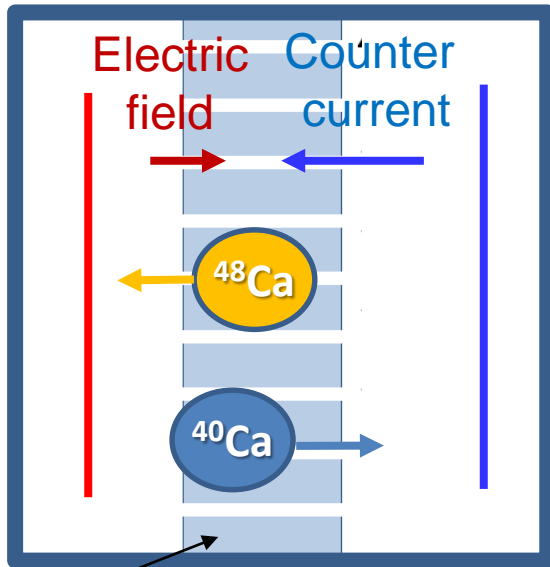
自然同位体比  
= 0.0019

## 濃縮効果

- 長い泳動距離 = 高い濃縮度
- $^{48}\text{Ca}$  大量化 → 現在、体積10~100倍システム  
大量化の際に想定される問題の洗い出し
- ク라운エーテルは非常に高価(5000円/g)  
→自分たちで合成する技術を開発：原材料費 1/1000



# Multi-channel counter current electrophoresis



BN plate 10 mm thick  
0.8mmΦ, every 4 mm

**PTEP**

Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 033D03 (10 pages)  
DOI: 10.1093/ptep/ptv020

**Calcium isotope enrichment by means  
of multi-channel counter-current electrophoresis  
for the study of particle and nuclear physics**

T. Kishimoto<sup>1,2,\*</sup>, K. Matsuoka<sup>2</sup>, T. Fukumoto<sup>3</sup>, and S. Umehara<sup>2</sup>

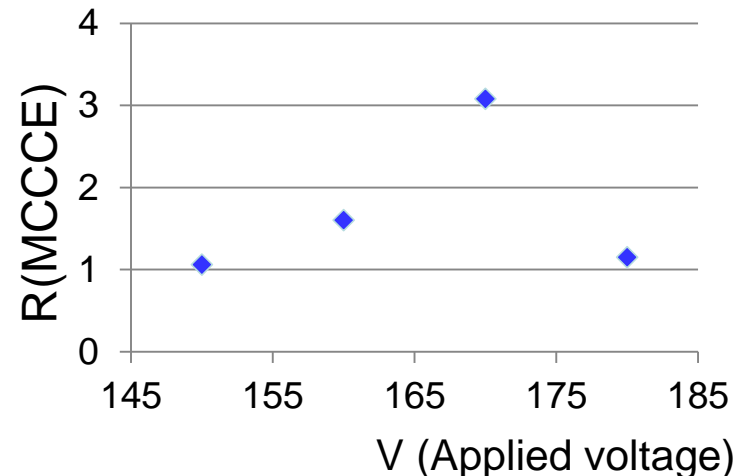
## MCCCE

- Separation using difference of migration speed between  $^{40}\text{Ca}$  /  $^{48}\text{Ca}$ .
- **Principle was demonstrated.**
- Further study on parameter optimization

**High enrichment**  
**Large amount**

$$R(\text{MCCCE}) = \frac{^{43}\text{Ca} / ^{48}\text{Ca}(\text{MCCCE})}{^{43}\text{Ca} / ^{48}\text{Ca}(\text{natural})}$$

Enrichment  
(43/40): 3.08  
**(48/40): 6**



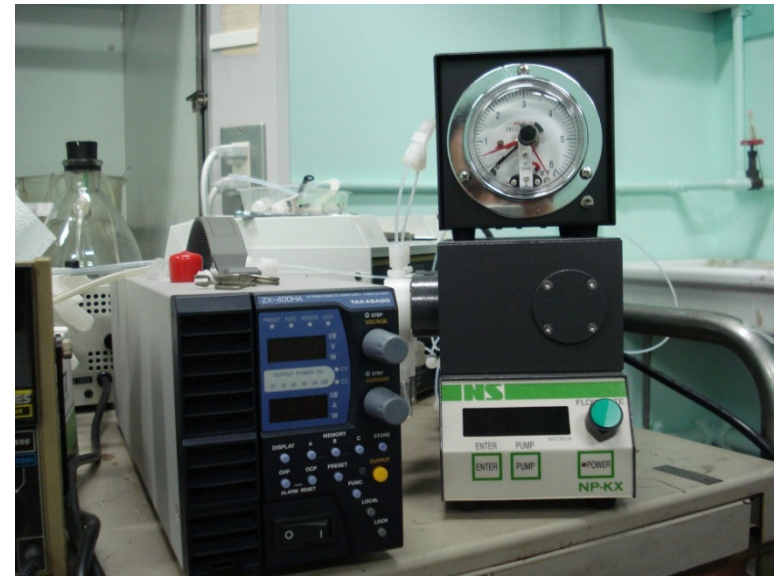
# 改善(のはずだったが)

- 液送ポンプ
  - チュービングポンプから
  - ダブルプランジャーポンプへ
    - スムーズかつ正確
- 泡、冷却系、その他
- うまく働かず
  - ハーゲン・ポアズイユ流
  - チュービングポンプ
  - イオン交換膜

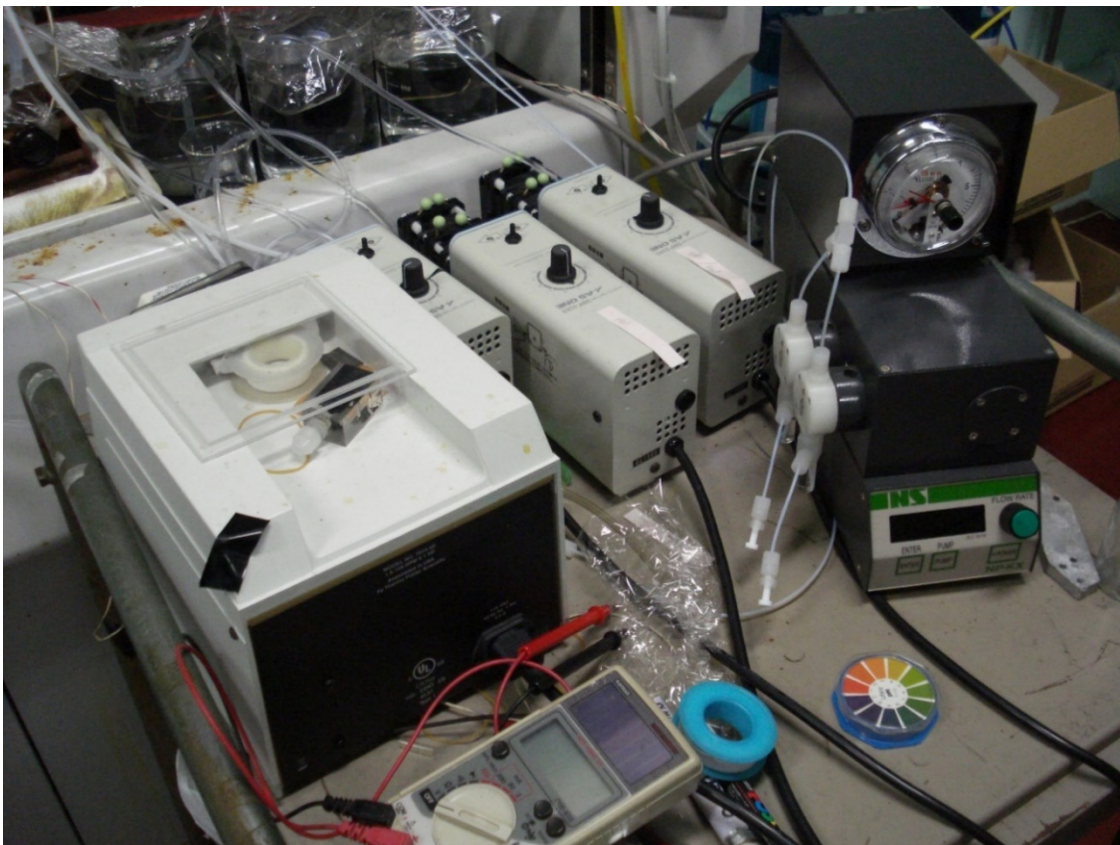
$$j_x = e\mu n \frac{d\phi}{dx} + eD \frac{dn}{dx}$$



Peristaltic pump  
(tubing pump)



# 脈動の生成



ダブルプランジャーポンプ +  
チュービング(ペリスタルティック)ポンプ

ロータリーピストン<sup>Candles</sup>  
ポンプ

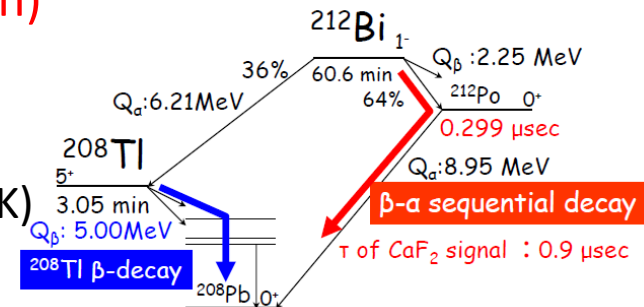
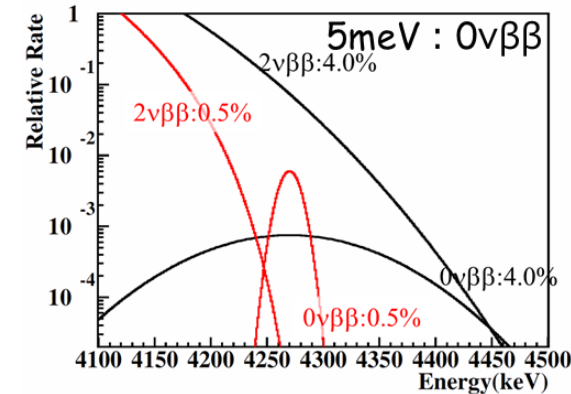


制御: 脈動、温度、イオン交換膜

$$j_x = e\mu n \frac{d\phi}{dx} + eD \frac{dn}{dx}$$

# Bolometer

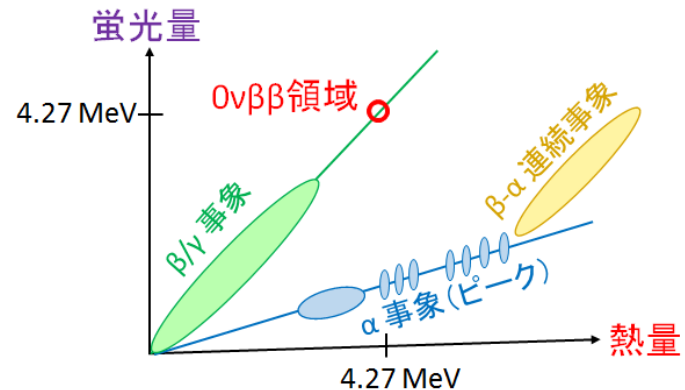
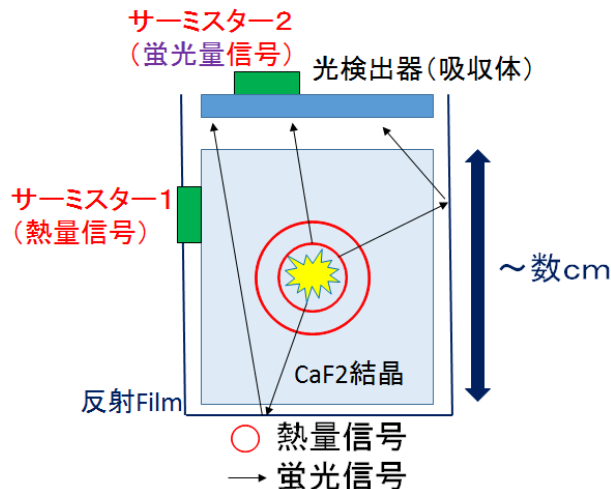
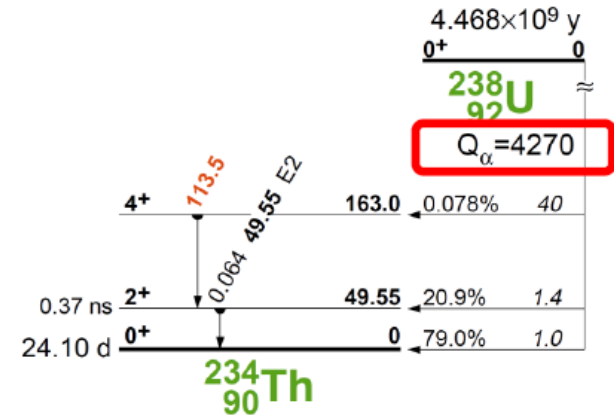
- $2\nu\beta\beta$ 事象 (Ultimate BG)
  - エネルギー分解能の改善 → Bolometer
- CaF<sub>2</sub>結晶内部の放射性不純物 (Th系列)
  - Th系列( $\beta$ - $\alpha$ 信号) → Bolometer (no quench)
  - Th系列(<sup>208</sup>Tl) → 結晶細分化
    - ELEGANT-VIの経験から  
10cm立方結晶 → 小型化 (4~5cmでOK)
- 環境中性子起源 $\gamma$ 線
  - エネルギー分解能の改善 + 結晶小型化



**Bolometer → 既存のBGは大きく低減可**

# Scintillating Bolometer

- 新しいBG候補
- $^{48}\text{Ca}$ のQ値 : 4267.98(32) keV
- $^{238}\text{U}$ のQ値 : 4270 keV  
 分解能改善だけでは除去不可  
 → **Scintillating Bolometerの開発**



- **熱量に加え、蛍光量も同時に測定**  
 蛍光の $\alpha$ 線のクエンチングを用いた $\alpha/\beta$ 粒子識別
- $^{238}\text{U}$ の崩壊事象 (Q値=4.27 MeV =  $0\nu\beta\beta$ 崩壊のQ値)を排除

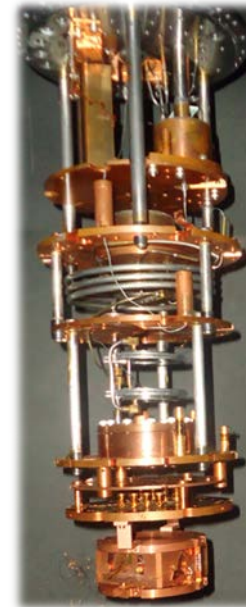
# Bolometer開発の現状 (1)

- 冷却テスト

## 冷却手順



液体窒素予冷 (77K)  
液体ヘリウム冷却 (4K)  
1K Potの減圧冷却 (1K)  
 $^3\text{He}/^4\text{He}$  混合ガス循環 ( $\sim 10\text{mK}$ )

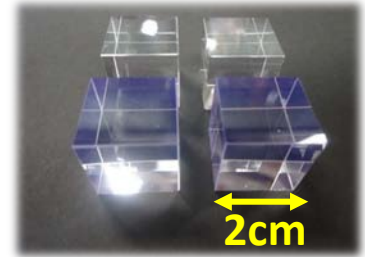


- 1K Potの減圧冷却までは実現済
- $\sim 10\text{mK}$ 冷却のための新しい $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合ガスシステムを構築済
- 希釈冷凍機の各ステージの温度計の読み出しシステムも構築済

# Bolometer開発の現状 (2)

- 熱信号検出器

- 結晶は1辺が2cmの立方体の $\text{CaF}_2$ (Pure)2個、 $\text{CaF}_2$ (Eu)2個を準備済
- NTDGeサーミスター、結晶、信号線のインストールは完了
- 熱信号読み出しシステムは構築済



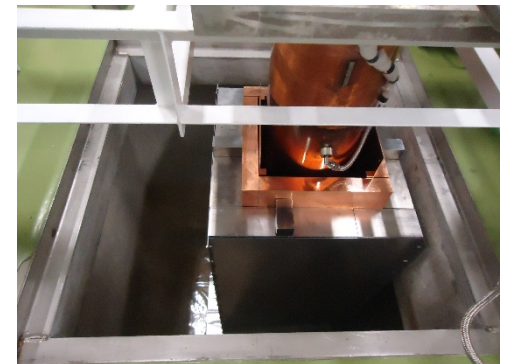
- 光信号検出器

- 光検出器の吸収体としてGeウェハーを準備済
- 熱信号検出後にインストール予定



- シールド

- 厚さ10cmの鉛と5cmの銅シールドを構築済





# A02: $^{48}\text{Ca}$ を用いたニュートリノのマヨラナ性の 研究と超高分解能技術の開発 -- CANDLES --



- $^{48}\text{Ca}$ の2重ベータ崩壊の研究

- CANDLES実験

- 低BG化
- 高分解能化

測定、解析継続

- $^{48}\text{Ca}$ の濃縮技術の開発と濃縮

- $\beta\beta$ 崩壊核の増大とBG低減の同時達成

- CE
  - レーザー
  - MCCCE
- CE樹脂  
μリアクター

開発研究

- ボロメーター技術の開発

- 高エネルギー分解能化

希釈冷凍機